Reconnaissance mise en œuvre pour le creusement du tunnel de St Béat (31)

GUITTARD JEROME, SOUVIGNET STEPHANIE, GASC-BARBIER MURIEL, VIRELY DIDIER
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Toulouse, 1 av. du colonel Roche 31400, Toulouse
jerome.guittard@equipement.gouv.fr ; stephanie.souvignet@equipement.gouv.fr,
muriel.gasc@equipement.gouv.fr, didier.virely@equipement.gouv.fr

Résumé
Un tunnel est envisagé pour dévier la RN 125 au niveau de St Béat (31-France). Le projet se situe dans la zone interne métamorphique qui se caractérise par des reliefs élevés et une dominante de calcaires marmoréens et de dolomie. Les trois phases tectoniques qui se sont succédées ont entraîné une structure complexe du massif (fortement fracturé et diaclasé). L'avancement actuel de l'étude est présenté ; l'objectif final est, d'une part l'acquisition des paramètres géologiques et géomécaniques en vue de l'application des critères AFTèS au dimensionnement de l'ouvrage et d'autre part l'amélioration de la connaissance de la modélisation géomécanique 3D d'un massif fracturé, en adéquation avec son utilisation.

Field investigations campaign realized for St Beat tunnel (France –31)

Abstract
The highway n° 125 is one of the few roads passing through the central Pyrenees at a medium altitude. It crosses the little town of St Béat that is built against a steep slope on a narrow pass along the Garonne River valley. At that place, tall cliffs overhang the town and the road. Thus, when a project of an alternative way has been discussed, the choice of a tunnel has been evident. Actually it is still a project but studies are quite advanced. The first stage, composed of bibliographical analysis, was realized with the help of the "Onyx, Marbre et Granulats" company (OMG), which exploits a marble underground mine, near St Béat. That company gave us access to many studies and to an abandoned gallery situated above the entry of the tunnel. The studied zone belongs to the Pyrenean metamorphic internal zone, which is characterized by marble limestone and dolomite. Three successive tectonic events gave to the rock mass a complex structure that seems to be constituted by subvertical layers, despite the lack of traces of foliation due to a recent metamorphism. Consequently the massif is highly fractured.
The knowledge of the area, focused on the regional geological and tectonic features, was based in a second stage, on aerial photo interpretation, on field investigations and on rock matrix and joints mechanical testing. Recent investigations are composed of horizontal boreholes including diagraphy and in situ mechanical testing (BHTV, BIPS, RAN, micro seismic test, dilatometer, boring, …)
The objectives of this study is to obtain, in a first time, the geological and the geomechanical model of the area in order to apply the AFTèS criteria for the tunnel construction and, in a second time, to make progress in the knowledge of the 3D geomechanical model of a such fractured rock mass all along the borrowing of the tunnel.

Mots clés : *Massif fracturé –données géologiques – lever de fracturation – modélisation géométrique*
Keywords : *fracturated rock – geological information – fracturation network - geometrical model*

Introduction

La RN 125 est un des seuls passage entre la France et l'Espagne dans les Pyrénées centrales, à faible altitude. Cet itinéraire traverse la ville de St Béat au niveau d'une cluse utilisée par la Garonne. La ville est située sur les rives du fleuve, accolée à la montagne (cf. figure 1a) et surplombée par des falaises. Ainsi, pour la réalisation de sa déviation, c'est la solution tunnel qui a été retenue. Son creusement est prévu pour 2006.
Dans un premier temps, une synthèse bibliographique complète des informations géologiques recensées sur la région a été réalisée. Elle a pu être menée à bien grâce, entre autre, à la collaboration de la société OMG (Onyx Marbre et Granulats). Cette société exploite à proximité plusieurs carrières de marbre en vue de l'obtention de charges minérales. Ainsi, elle a déjà mené pour

son propre compte différentes études géotechniques in situ et en laboratoire et nous a donné libre accès à ces informations. De plus, elle a mis à notre disposition d'anciennes galeries, aujourd'hui abandonnées, qui ont permis l'étude du marbre vieilli et la réalisation de relevés de fracturation selon différentes orientations, sur des parois mises à nu. La principale galerie étudiée, dite « galerie du château » se situe à 35 m à l'aplomb du tracé du tunnel ; l'autre, plus petite, se situe en tête nord du tunnel. La zone étudiée présente de nombreux systèmes de failles et de diaclases qui nous ont poussés à une étude plus approfondie de la fracturation. Celle-ci s'est traduite par l'acquisition de nombreuses données de terrain (relevés et essais in situ) qui laisse entrevoir des possibilités de recherche sur la modélisation des massifs fracturés. Nous présentons dans cet article l'ensemble des études in-situ qui ont pour l'instant été réalisées, ainsi que les perspectives envisagées en terme de modélisation.

Acquisition des données géologiques générales

L'acquisition des données géologiques a été réalisée grâce à de nombreux relevés sur place, l'utilisation de la carte géologique (*Figure 1*b) et au concours de la société OGM, comme nous l'avons déjà dit. Nous présentons donc, dans un premier temps, l'ensemble de ces informations.

La zone interne métamorphique

La zone d'étude se trouve dans la zone interne métamorphique, qui est limitée par deux accidents crustaux subverticaux : la Haute chaîne primaire, au sud, et le massif nord pyrénéen de la Barousse, au nord. La Zone interne est essentiellement constituée de terrains secondaires antécénomaniens métamorphiques (Trias à Albien supérieur). En raison de sa lithologie calcaire ou dolomitique dominante (marbre), elle coïncide avec une ligne de reliefs assez élevés, escarpés ou boisés (Cap du Mont, 1 207 m et Montagne de Rié, 1 128 m, au confluent de la Garonne et de la Pique). Trois phases tectoniques y sont reconnaissables :

- La phase 1 est bien marquée par une schistosité de flux (marbre d'Ilhet par exemple) et par des plis d'écoulement (marbres de Saint-Béat) ; elle est responsable de plis d'échelle kilométrique, à axe sub-horizontal orienté W.NW / E.SE, que l'on retrouve sur les études de photo-interprétation (Figure 2).
- La phase 2 est associée à une schistosité de fracture sub-verticale ; elle est à l'origine de plis à axe vertical, comme l'anticlinal du Cap du Mont (Est de la Garonne). Cette phase est aussi responsable de la formation de brèches tectoniques par fracturation et éclatement de roches compétentes.
- La phase 3 est révélée par une schistosité de fracture sub-horizontale.

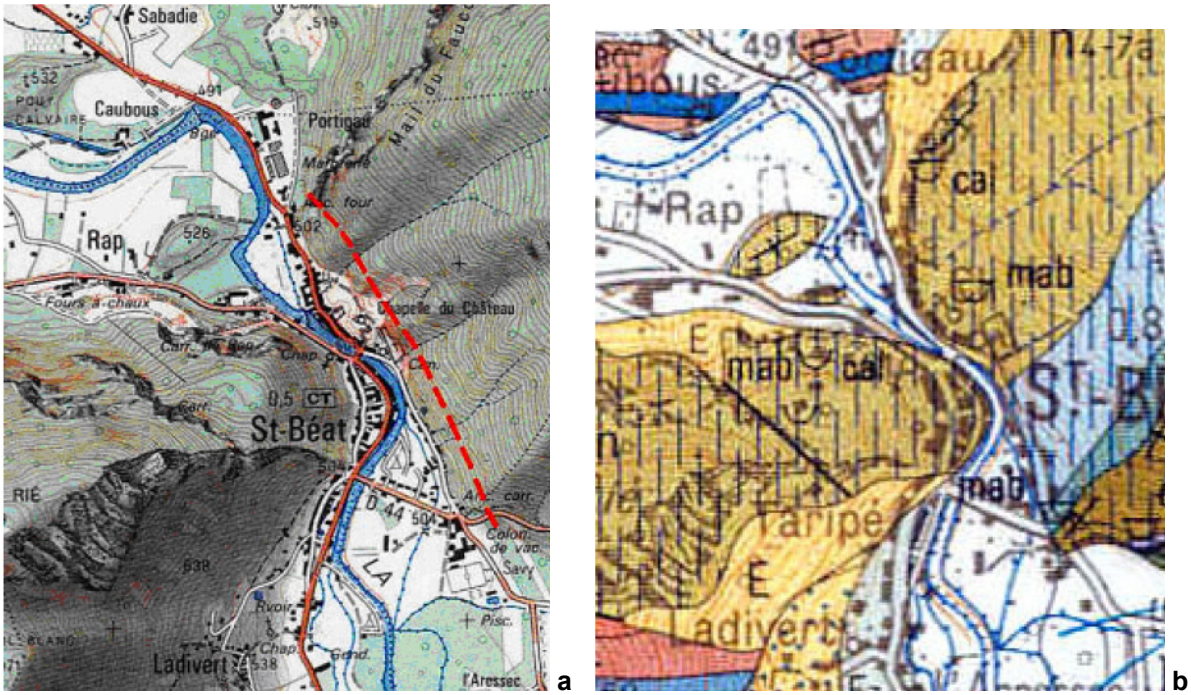


Figure 1 : *Carte physique (a) et carte géologique (b) de la zone de St Béat*

Fig 1: *topological (a) and geological (b) maps of St Beat area .*

Photo-interprétation

Le travail d'analyse sur photo aérienne a été effectué à partir de la photographie n° 2068 – mission FD 09-31/250 29.08.98. La Figure 2 présente la synthèse des entités qui ont ainsi pu être positionnées, à savoir :

- Deux cônes de déjections débouchant sur la vallée de Saint-Béat.
- Des failles principales conformes à la faille nord pyrénéenne et d'attitude est / ouest.
- Des failles secondaires ou régionales d'attitude nord / sud, conjuguées à 90° aux failles principales.
- Des failles locales, affectant le flanc ouest / nord-ouest du Cap du Mont.

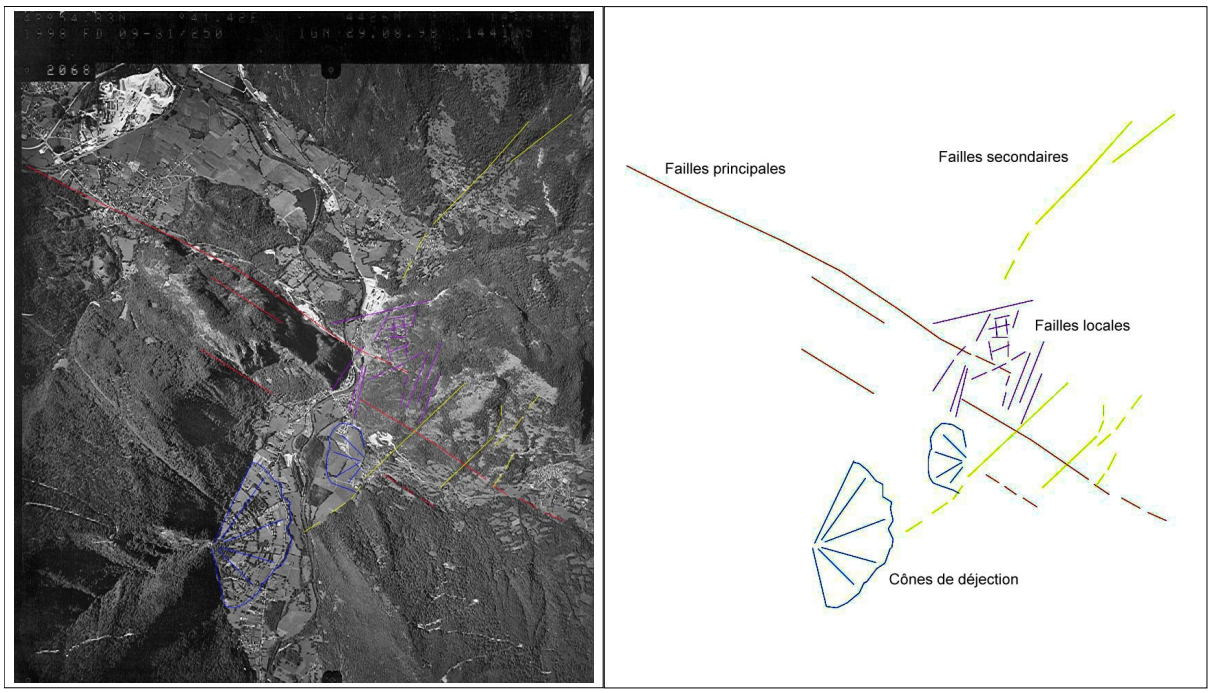


Figure 2 : *Synthèse de la photo-interprétation réalisée sur le secteur de St-Béat*

Une seconde analyse de la photo au 1 / 8 000ème (extrait de la photographie 380 – mission DDE 31 16/02/1988) non présentée ici, a également été réalisée et on y retrouve les unités géologiques qui sont conformes à celles obtenues à l'échelle 1/25000ème avec une information supplémentaire : des linéations nord nord-ouest / sud sud-est dans l'unité géologique la plus jeune, deux failles principales situées sur le tracé du tunnel, en tête nord et dans le talweg du château et trois failles secondaires qui ne concernent pas le tracé.

Le gisement de marbre de St Béat
De part la structure cristalline du marbre, la fracturation est rugueuse et les blocs s'engrènent assez bien les uns dans les autres. Ainsi, malgré l'intense fracturation dans la masse, on constate par les galeries actuelles, une bonne tenue des roches. Seuls des accidents localisés majeurs mais non encore rencontrés, pourraient rompre l'harmonie tectonique. S'ils apparaissent, il faudrait les interpréter et agir en conséquence pour les intégrer.

Observations hydrogéologiques
En ce qui concerne les circulations d'eau dans le massif calcaire, elles seront en général peu abondantes mais des écoulements temporaires importants sont à attendre en cas de fortes pluies.

Lever géologique du cap du Mont – étude de la fracturation
L'étude générale de la fracturation montre que le secteur est souvent très diaclasé sauf exception de la brèche rencontrée à la tête sud. Une première analyse rapide des discontinuités a été effectuée, en surface et à l'intérieur du massif, en profitant notamment des deux galeries existantes. L'analyse a porté essentiellement sur la densité globale des discontinuités (les classes de fracturations obtenues pour les différentes stations vont de ID4, fracturation forte à moyenne, à ID2, fracturation faible à moyenne) et sur l'organisation des discontinuités en familles.
Plus précisément, la structure d'ensemble est organisée autour d'un pli anticlinal d'échelle kilométrique, à axe plongeant fortement vers le nord-ouest, qui apparaît assez bien au sommet du Cap du mont sur la carte Arreau. Les terrains rencontrés par le tracé, s'échelonnent du plus ancien au plus récent, du Lias à l'Aptien-Albien inférieur. Il s'agit essentiellement de terrains calcaires métamorphisés qui ont été identifiés par comparaison avec ceux des séries non métamorphiques. Toutes les formations observées correspondent à des roches saines.

Dans un second temps, des relevés systématiques de la fracturation ont été réalisés, en utilisant les feuilles mises au point au CETu ([Tignol *et al.*, 2002], [Chantron & Zumbo, 2002]). Dans la galerie du château, sept lignes (horizontales et verticales) ont été réalisées (Tableau 1 et

Figure 3). Dans la mesure du possible, l'ensemble des parois a été relevé afin de couvrir plusieurs orientations (pour une longueur totale de 80 mètres) et à chaque profil horizontal il a été associé un profil vertical (plus court pour des raisons d'accès) afin de recouper au mieux les familles de discontinuités. Ceci se vérifie particulièrement sur les profils 4H et 7V qui se situent en bord de galerie et sur lesquels on constate la présence de failles perpendiculaires à l'axe du tracé.

Tableau 1: *longueur des lignes de relevé de fracturation systématique*

	1	2	3	4	5	6	7	Longueur (m)
Horizontal	10	10	10	10	10	10	-	60
vertical	3,5	2,5	3	4	3	-	4,5	20,5

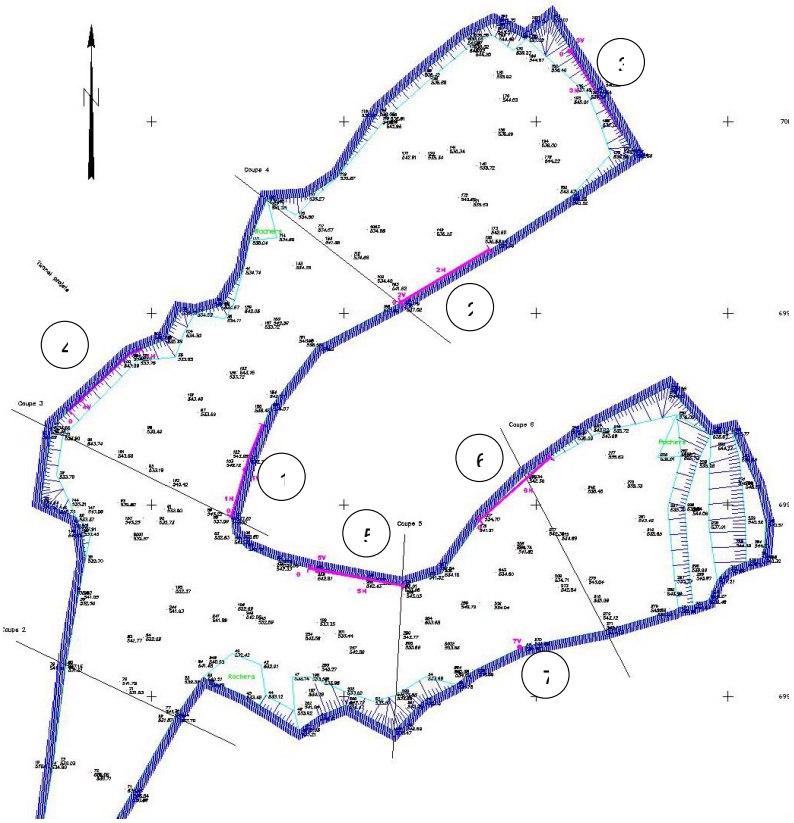
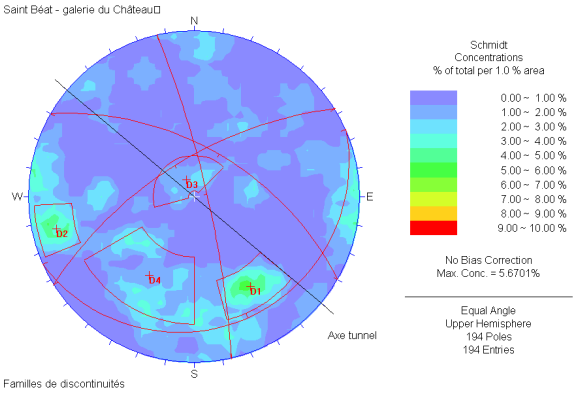


Figure 3 : *Lignes de relevé systématique des failles dans la galerie du château*

Des levés systématiques supplémentaires ont également été réalisés sur des affleurements en pied de falaise dans le calcaire gris marmoréen et jusqu'à proximité de la brèche romaine (tête sud du tunnel), soit 4 profils supplémentaires sur une longueur de 60 m au total.

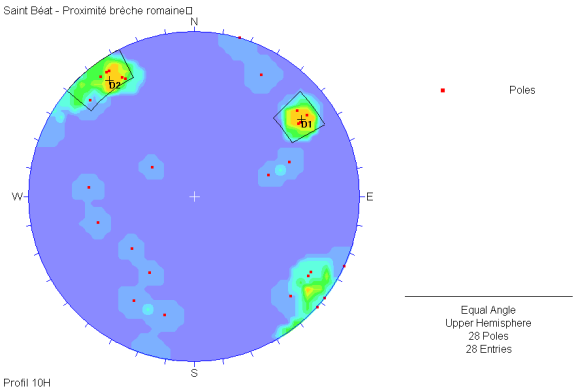
Sur l'ensemble de ces relevés a été effectué un travail d'analyse par canevas de Wulff et de Schmidt. L'identification des différentes familles a été possible grâce à l'analyse séparée des différents profils et la prise en compte des relevés verticaux ; les profils semblables ont ensuite été regroupés. La Figure 4 présente la synthèse des relevés effectués sur la galerie du château. Seules les familles les plus fréquentes sont indiquées. Les quatre mêmes familles se retrouvent le long du tracé (dans les calcaires gris marmoréens), sur les lignes relevées à l'extérieur des galeries, et ce, à quelques variations dans les valeurs de pendage près.

La Figure 5 présente quant à elle, les résultats obtenus en tête sud. Le profil est orienté N40 dans les calcaires rubanés marmoréens gris et blancs. Il se situe à proximité de la brèche romaine et de la faille Nord-Pyrénéenne. A cet endroit, d'après la carte géologique d'ensemble du BRGM, on peut définir une orientation proche de N90° pour la faille Nord-pyrénéenne. Compte tenu de l'orientation du profil de mesure, D'1 a été caractérisé grâce à une ligne verticale.
Ces deux exemples bien différents sont présentés afin d'illustrer la complexité de la structure du massif, les deux zones de relevés étant distantes de quelques centaines de mètres seulement.



	Orientation	Pendage	Espacement	Persistance
D 1	N130-165	55-75°	10-30 cm 60-100 cm	0-1.5 m localement métrique
D 2	N248-267	73-88°	0-50 cm	0-1.5
D 3	N255-45	4-28°	0-10 cm	0-1 m
D 4	N180-204	40-75°	0-10 cm	0-0.50 cm / 0.5 – 3 m

Figure 4 : *bilan sur la galerie du château (marbre blanc)*



	Orientation	Pendage	Espacement	Persistance
D'1	N45-61	68-84°	150 cm	0 – 3 m
D'2	N310-333	78-90°	< 1 m	0 – 3 m

Figure 5 : *bilan des relevés en tête sud (calcaires rubanés marmoréens gris et blancs)*

Analyse des données mécaniques (essais)

Les deux sondages carottés qui ont été réalisés au niveau de la tête sud et de la galerie du Château ont permis la reconnaissance de trois des faciès qui vont être rencontrés lors du creusement du tunnel. Il a été pratiqué les essais usuels d'identification sur ces roches, ainsi que des essais d'abrasivité, de forabilité et de broyabilité sur les deux faciès principaux, à savoir les calcaires métamorphisés blancs et gris

Essais de compression simple

Le Tableau 2 présente les résultats des essais mécaniques réalisés sur le marbre blanc du sondage SC 57. Des tableaux identiques existent pour les autres faciès rencontrés. À partir de la courbe effort déformation obtenue durant l'essai de compression simple, le module d'Young a été pris entre 1/3 et 2/3 de la rupture. cette valeur est dite « globale ». Elle intègre les déformations de l'éprouvette tant dans les zones frettées en tête d'éprouvette que dans la zone centrale. Cette valeur est voisine de celle donnée par les relations empiriques de Bieniawski.

Tableau 2 : *Caractéristiques mécaniques du marbre blanc (sondage SC 57)*

SC 57 Marbre blanc	R 41	R 43	R 44	Moyenne	Écart type
profondeur	1,52 – 1,90	13,84 – 14,34	18,4 – 18,9		
V_p (m.s^{-1})	6 157	6 172	6 049	6 126	67
Masse volumique, ρ (kg.m^{-3})	2 703	2 705	2 700	2 703	3
σ_c (MPa)	86,4	91.9	91.7	90.0	3.1
E_{global} (GPa)	19,0	18,3	18,6	18,6	0,4

Essais sur discontinuités
Des essais de cisaillement à force constante sur discontinuités ont été réalisés sur le calcaire marmoréen, grâce à la presse haute pression (1 MN) et la boite de cisaillement (250*250 mm) disponible au LRPC de Toulouse. Ils ont permis de mettre en évidence le comportement saccharoïde des discontinuités. D'autres essais, avec des chemins de contrainte plus élaborés vont être menés au cours du mois de février et seront présentés ultérieurement.

Essais mécaniques in situ
Une campagne d'essais in-situ comprenant des essais au vérin plat et des essais de surcarottage a été réalisée sur le site, à la mi-janvier 2005, par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon. Les résultats ne sont pas disponibles à ce jour pour être inclus dans le texte, mais seront présentés lors de l'exposé.

Première tentative de construction d'un modèle géologique
Grâce à l'ensemble des informations collectées et résumées plus haut, une première tentative de construction d'un modèle géologique a été menée. Le premier objectif de ce modèle est d'essayer de reproduire au mieux ce qui est observé sur le terrain, en particulier comparer la visualisation des relevés en paroi avec les coupes pouvant être reproduites par le modèle. Pour cela nous avons utilisé différents logiciels permettant de reproduire des données de fracturation, à savoir les codes Udec (Itasca software), Résoblok, et Masfra.

Resoblok ([Heliot, 1988] ; [Asof, 1991] [Baroudi *et al*., 1992] ; [Koroni *et al*., 1995]) est développé au LAEGO, laboratoire commun à l'Ecole des Mines de Nancy (ENSMN), l'Ecole de Géologie (ENSG) et l'INERIS. Il s'appui sur le principe de l'identification des blocs-clés par la méthode déterministe [Goodman et Shi, 1985] et sur l'algorithme de stabilité de Warburton [Warburton, 1981].

Il est important de noter que, tout comme Masfra, Resoblok n'est pas commercialisé, et son utilisation est le fruit d'un accord de collaboration passé entre le LR de Toulouse et le LAEGO (V. Merrien-Soukatchoff). Resoblok utilise un langage informatique spécifique, appelé BGL (Block Generation Langage), qui permet d'écrire un scénario, qui sera ensuite interprété pour générer l'assemblage de blocs. D'un point de vue conceptuel, l'architecture de Resoblok est organisée de la manière suivante :

- Un module de modélisation géométrique du massif sous forme d'assemblages de blocs. L'introduction des fractures peut être réalisée de façon déterministe ou statistique ; dans ce cas, chaque famille est définie par une loi statistique caractérisant l'orientation et une autre caractérisant l'espacement.
  L'extension des fractures est prise en compte soit en arrêtant celles-ci les unes sur les autres (prise en compte de l'histoire géologique supposée), soit en admettant des fractures polygonales. L'assemblage des blocs est généré sous forme d'un fichier base de donnée par l'intermédiaire du module **bg**. Ce module utilise différentes séries de nombres pseudo-aléatoires pour générer des assemblages de blocs différents à partir un même fichier scénario. Le numéro de simulation, est le paramètre permettant le repérage de chaque série particulière de nombre pseudo aléatoire.
- Différents modules « avals » permettent d'étudier l'assemblage de blocs ainsi créé : le module **bd**, qui permet de représenter les blocs graphiquement ; le module **bh** qui permet de représenter les histogramme des volumes des blocs sélectionnés, ainsi que les surfaces des faces correspondantes, et enfin le module **bsa** qui permet l'analyse de stabilité des blocs isolés (blocs stables, chute libre, glissements plans, glissements dièdres)

La Figure 6 présente un « bloc » de 10*10*10 m réalisé en utilisant la synthèse des relevés de fracturation réalisés à la galerie du château, dans les marbres blancs (cf. Figure 4). Des développements sont en cours pour l'étude de la stabilité d'un tunnel dans un tel contexte (en prenant en compte les caractéristiques des joints).

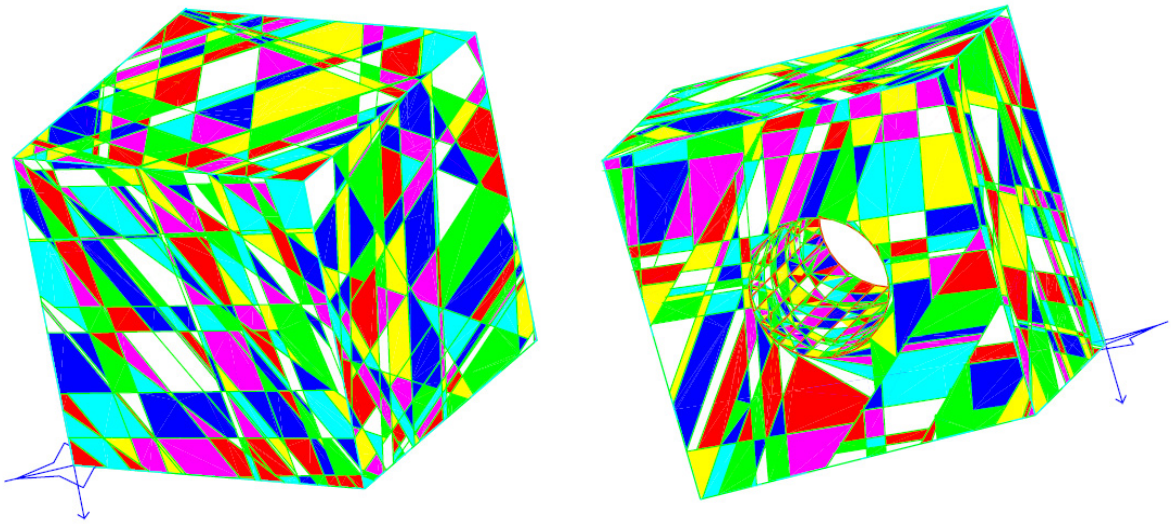


Figure 6 : *Modèle 3D réalisé avec Résoblok (avant et après excavation du tunnel)*

Masfra est un programme, développé sous Visual Basic, par A. Pouya du LCPC (Pouya et Ghoreychi, 2001a, 2001b ; Pouya et Courtois, 2002). Il a été conçu, à la base, comme support d'un calcul mécanique classique. Il permet de représenter en trois dimensions des réseaux de fractures, puis de couper le bloc ainsi créé par un plan de coordonnées choisies. Le but initial du programme était d'utiliser ensuite le réseau de fracture obtenu dans ce plan, comme base pour un maillage ultérieur à réinjecter dans un code de calcul mécanique. Son développement pour d'autres fonctionnalités est en encore en cours et son application au cas étudié également.
Dans son fonctionnement, Masfra, définit les fractures comme des disques de rayon donné dont la répartition au sein de la famille est définie par une fonction exponentielle. On utilise des coordonnées sphériques pour indiquer les orientations des fractures, qui sont ensuite simulées selon une distribution gaussienne. Le bloc créé peut ensuite être recoupé par des plans ou des droites (pour simuler la création de fronts de taille ou de sondages).

Udec présente quant à lui, l'avantage de pouvoir réaliser des calculs mécaniques. Nous nous sommes pour l'instant limités à la comparaison « visuelle » des traces de fractures modélisées, avec ce qui peut être observé en paroi. La Figure 7 présente une représentation de ce que l'on obtiendrait en front de taille suivant l'axe du tunnel (bloc de 10*10m), à partir des relevés de la galerie du château. Cette représentation est pour l'instant moins satisfaisante, comparée aux données terrain, que celle proposée par Résoblok. Un travail de rétro-analyse, concernant les paramètres du modèle est en cours, pour affiner les résultats. On peut par exemple noter, qu'un des paramètres demandés par Udec est la distance d'écartement entre deux familles parallèles. Or, lors d'un relevé systématique par ligne, cette distance n'est jamais mesurée, et elle est de toute façon très délicate à apprécier in situ.

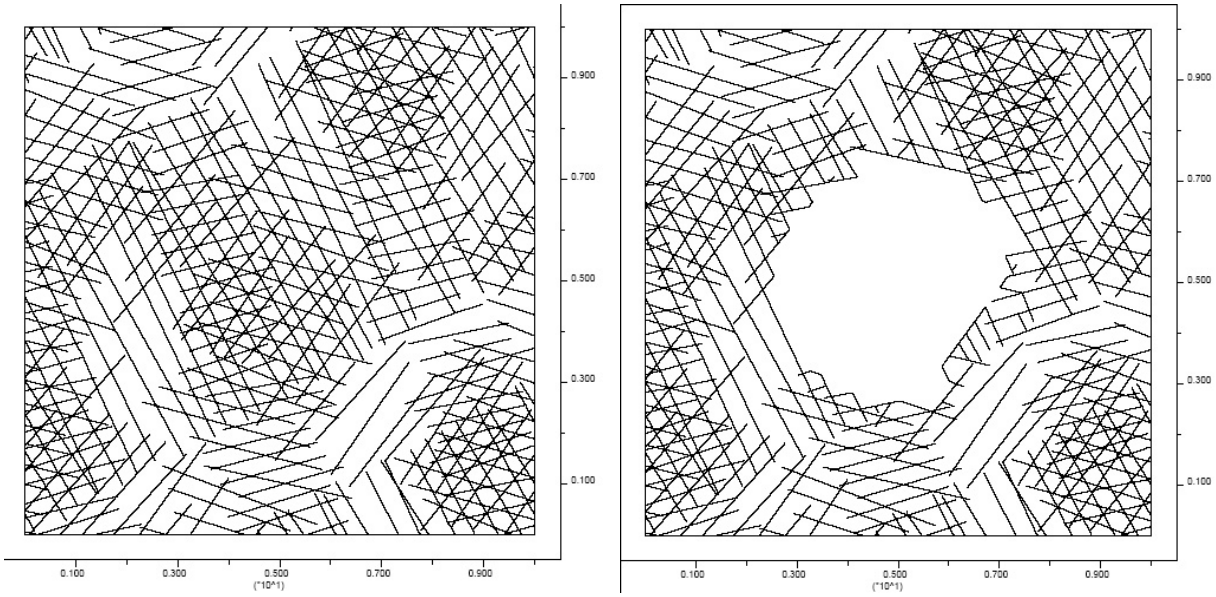


***Figure 7** : Modèle avec Udec (avant et après l'excavation du tunnel)*

Bilan et perspectives actuelles

L'étude « technique » portant sur le creusement du tunnel de St Béat est encore en cours au moment où nous écrivons. La série de forages horizontaux doit débuter à la mi-février 2005, et nous espérons pouvoir présenter les résultats de diagraphie lors du congrès. Ces résultats seront exploités de différentes manières : évidemment d'un point de vue opérationnel afin de pouvoir correctement dimensionner le tunnel mais nous souhaitons également nous appuyer sur ces informations pour pouvoir progresser sur la connaissance des massifs fracturés. En effet, la longueur significative de relevés systématiques sur affleurement, conjuguée aux relevés de fracturation en sondage par caméra, devrait permettre d'obtenir une masse d'information suffisante sur lesquels nous souhaitons nous appuyer pour avancer sur la connaissance des biais induits lors de la modélisation des massifs fracturés.

Il ne faut, en effet, pas perdre de vue que le problème majeur, pour le traitement statistique des données, reste bien la représentativité de l'échantillonnage effectué, celui-ci étant naturellement biaisé, d'une part par l'orientation des affleurements et/ou des forages où sont réalisés les relevés, et d'autre part par la sensibilité du géologue qui effectue ces relevés. L'utilisation conjointe de relevés en forage et la systématisation des relevés terrain constitue donc des informations a priori plus objectives, d'où l'intérêt de faire des relevés aussi exhaustif que possibles. De plus, l'extrapolation des données nécessairement ponctuelles par rapport à la taille de l'ouvrage est délicate et donne lieu à diverses recherches (Fouché et al., 2002 ; Alfonsi et al., 2004 ; Bedjaoui et al., 2004 ; Rajmeny et al., 2004 ; Ramamurthy, 2004 ; Alfonsi et Fouché 2005).

Remerciements

L'ensemble de ce travail a pu être mené et peut continuer grâce à une collaboration étroite avec Ms Robert, Chantron et Bouguet du CETu, Ms Grabié et Taimiot de la DDE 31 ainsi que Ms. Pouya et Alfonsi du LCPC et Mme Merrien-Soukatchoff de l'ENSMN.

Références

ALFONSI P, FOUCHE O, 2005 : L'évaluation du risque géologique dans le creusement des tunnels dans les massifs rocheux : le besoin et les difficultés d'une simulation stochastique du réseau de fracture. *Geoline International Symposium, Lyon (France, 23-25 mai 2005)*. A paraître.

ALFONSI P, FOUCHE O., BOURGEOIS E., 2004 : Foundation on rock : effect of rock fractures on settlement of bridge piers. *First UDEC/3DEC Symposium Bochum (Allemagne), 30 sept. 1 oct. 2004. A.A. Balkema.*

ASOF M., 1991 : Etude du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés en blocs (méthode à l'équilibre limite) : réalisation et applications. *Thèse de doctorat de l'INPL de Nancy, 142 p.*

BAECHER G.B., 1983 : Statistical analysis of rock mass fracturing. *Mathematical Geology, vol 15, n°2, 329-348.*

BAROUDI H., ASOF M., PIGUET J.-P., 1992 : Bench stability in open pit mines : a methodology for jointed rock masses. *Regional conference on fracturated and jointed rock masses. Lake Tahoe, California, June 3-5 1992.*

CHANTRON L., ZUMBO V., 2002 : Formalisation des critères descriptif d'un massif rocheux – Mise au point d'une feuille de saisie des discontinuités. *JNGG 2002, 8 et 9 Octobre 2002, Nancy.*

FOUCHE O., ALFONSI P., CHANTRON L., DURVILLE J.-L., 2002 : Des forages à la simulation mécanique des massifs rocheux ; l'apport d'une approche probabiliste 3D des réseaux de discontinuités. *JNGG 2002, 8 et 9 Octobre 2002, Nancy*

GOODMAN R.E. & SHI G.H., 1985 : Block theory and its application to rock engineering. New Jersey: Prentice Hall.

HELIOT D., 1988 : Conception et réalisation d'un outil Intégré de modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*

KORINI T., SOUKATCHOFF V., BENNANI M., 1995 : Optimisation du soutènement par boulonnage des excavations creusées dans un massif rocheux fracturé en blocs. *Séminaire de Formation « modélisation des milieux discontinus » 11-15 sep. 95, Ecole des Mines de Nancy.*

POUYA A., GHOREYCHI M., 2001a : Homogénéisation numérique de la résistance mécanique des massifs fracturés. *Revue Française de Géotechnique.(94) 49-57.*

POUYA A., GHOREYCHI M., 2001b : Determination of rock mass strength properties by homogenisation, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 25, (2001), 1285-1303*

POUYA A., COURTOIS A., 2002 : Définition de la perméabilité équivalente des massifs fracturés par des méthodes d'homogénéisation , *C.R. Géosciences, 334 (2002) 975-979*

RAJMENY P.K., SINGH U.K., RATHORE S.S., 2004 : A new model to estimate rock mass strength accounting for the scale effect. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc. 41(2004) 1013-1021.*

RAMAMURTHY T., 2004 : A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc. 41 (2004) 89-101.*

TIGNOL O., CHANTRON L., BOURQUENCIER M., 2002 : Feuille de saisie des caractéristiques géologiques d'un massif rocheux – Mode d'emploi. *Document CETU ref. G0203 - 05*

WARBURTON P.M., 1981 : Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free face. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18 (1981) 415 –427.*